

# Procedimentos para análise e validação de atributos da qualidade da água

*Procedures for analysis and validation of attributes of water quality*

Juliana Cláudia Bezerra Campos<sup>1\*</sup> , Eugênio Pacelli Fernandes Leite<sup>1</sup> 

## RESUMO

O tratamento incorreto de efluentes líquidos, assim como o seu lançamento inadequado, caracterizam algumas das maiores problemáticas ambientais e pode contribuir para a deterioração dos ecossistemas aquáticos. Nesse contexto, a utilização de modelos de predição possibilita, especialmente no caso de volumes, a observação do comportamento dos atributos em estudo, identificando setores em que possíveis problemas de poluição hídrica estão mais presentes. Assim, o objetivo principal do presente trabalho foi a obtenção de volume dos atributos da água para a alcalinidade, a condutividade e a turbidez, o que possibilitou a análise espacial deles. A área de estudo, o Lago das Cinco Fontes, está localizado no Parque Zoobotânico Arruda Câmara, em João Pessoa, Paraíba, que resulta de nascentes e do aporte de efluentes provenientes da população do entorno. Foram estabelecidos 18 pontos para a coleta de amostras, 9 na superfície e 9 em profundidade, e para a obtenção de volumes e representação voxel, utilizou-se o algoritmo *Spline* regularizado com tensão implementado no SIG GRASS e o *software* Vis5D. Também foram elaborados gráficos com variações das concentrações de acordo com a profundidade e os pontos de coleta. Os procedimentos metodológicos foram validados com o auxílio das estatísticas Critério de Informação de Akaike (AIC), Erro Quadrático Médio (EQM) e Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), e toda a metodologia desenvolvida apresentou-se como ferramenta estratégica para o monitoramento daquele corpo hídrico.

**Palavras-chave:** efluentes; volumes; interpolação; validação; monitoramento.

## ABSTRACT

Inadequate treatment of liquid effluents, as well as inadequate treatment, characterizes some of the major environmental problems and may contribute to the deterioration of aquatic ecosystems. In this context, the use of prediction models allows, particularly in the case of volumes, the observation of the behavior of the attributes under study, identifying sectors where possible problems of water pollution are more present. Thus, the main objective of the present work was to obtain volume of water attributes for the alkalinity, conductivity and turbidity, which made possible the spatial analysis of the same. The study area, Lago das Cinco Fontes is in the Arruda Câmara Zoobotanical Park, in João Pessoa, Paraíba, and results from springs and effluents from the surrounding population. In order to obtain volumes and voxel representation, 18 points were established for sample collection, 9 on the surface and 9 in depth. The standardized Spline algorithm with voltage implemented in SIG GRASS and Vis5D software was used. Graphs with concentration variations were also drawn according to depth and collection points. The methodological procedures were validated with the aid of AIC, EQM and  $R^2$  statistics and any developed methodology was presented as a strategic tool for the water body's monitoring.

**Keywords:** effluents; volumes; interpolation; validation; monitoring.

## INTRODUÇÃO

O aumento das impurezas presentes nos corpos hídricos contribui significativamente para a deterioração dos ecossistemas aquáticos e pode apresentar como principal razão o lançamento inadequado de efluentes líquidos, assim como seu tratamento inadequado e/ou deficiente. No entanto, sabe-se que, quando a qualidade da água se encontra comprometida, é possível verificar a intensidade dos danos ao ambiente

a partir do monitoramento e da análise de determinados indicadores (VON SPERLING, 2005). Nesse sentido, o conhecimento da qualidade das águas, especialmente dos corpos hídricos, é uma tentativa de monitoramento e prevê a possível deterioração deles ao longo do tempo (TOLEDO; NICOLELLA, 2002).

Desse modo, sabe-se que alguns atributos específicos podem ser utilizados para mensurar aspectos referentes à qualidade das águas.

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - João Pessoa (PB), Brasil.

\*Autor correspondente: julianaifpb@gmail.com

Recebido: 07/06/2014 - Aceito: 02/05/2018 - Reg. ABES: 136045

A alcalinidade, por exemplo, é responsável pela manutenção para que os valores de pH permaneçam próximos de 7,0, característica fundamental para a maioria dos seres aquáticos que se adaptam melhor a um pH neutro.

Por outro lado, a condutividade, que depende das concentrações iônicas e da temperatura do ambiente, representa um bom indicador das modificações dos componentes da água, como sua composição mineral (PHILIPPI JR.; ROMERO; BRUNA, 2004). Moraes (2008) afirma que a condutividade indica a quantidade de sais existentes na coluna d'água e, portanto, representa uma medida indireta da concentração de poluentes — geralmente, níveis superiores a 100  $\mu\text{S.cm}$  indicam ambientes impactados.

Quanto aos níveis de turbidez em ambientes aquáticos, Philippi Jr., Romero e Bruna (2004) destacam que, quando em altas concentrações, reduzem a fotossíntese de algas e da vegetação submersa. Segundo Bukata *et al.* (1995), uma elevação da turbidez também pode causar modificações nos ciclos biodinâmicos e interferir na velocidade e na intensidade da ação fotossintética. Em lagos e represas, em que a velocidade de escoamento da água é menor, a turbidez pode ser bastante baixa. Além da ocorrência de origem natural, a turbidez da água pode também ser causada pelo lançamento de efluentes domésticos ou industriais.

Nesse contexto, sabe-se que é cada vez mais frequente o comprometimento da qualidade das águas nos corpos hídricos e, com base na problemática exposta anteriormente, torna-se necessário o conhecimento das características dos recursos hídricos, principalmente quando se pode utilizar ferramentas e instrumentos de monitoramento. Segundo Tundisi (2003), esse também pode ser o primeiro passo importante para a elaboração de um banco de dados confiável e adequado, que possa ser útil ao planejamento e ao gerenciamento deles.

Desse modo, a utilização de ferramentas, como os modelos de predição, que possibilita a visualização de parâmetros que caracterizam a qualidade da água possibilita, especialmente no caso de volumes, a observação do comportamento de determinado atributo em estudo. Além disso, também pode identificar, no corpo hídrico em estudo, setores em que possíveis problemas de poluição hídrica estão presentes e quais os impactos que podem provocar ao ambiente. Uma das formas de apresentar o comportamento de determinado atributo pode se dar por meio de procedimentos de interpolação espacial, utilizados para se estimar valores de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos (ALVES; BIUDES; VECCHIA, 2012).

Os procedimentos de interpolação espacial são utilizados, em geral, para estimativas de superfícies e de volumes. Dados oriundos de tais procedimentos têm ampla aplicação no estudo da paisagem, possibilitam a obtenção de informações com uso diversificado em estudo de recursos naturais, sob a égide de vários ramos

de conhecimento (LEITE, 2005). Os fenômenos que podem ser representados por meio dos tipos dos dados supracitados são variados, e podem ser desde a representação do relevo de uma área até a previsão da migração de agentes poluentes no solo, por exemplo, a partir de modelos multidimensionais, com maior complexidade (LEITE; SILVA; GOMES, 2007).

Assim, o uso de geotecnologias, a exemplo dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), conjuntamente com algoritmos de interpolação espacial, pode potencializar a visualização de cenários e tendências relacionadas aos usos múltiplos e aos conflitos gerados pelo desequilíbrio na qualidade das águas superficiais (MAIA *et al.*, 2008). Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi a obtenção de volume dos atributos da água, alcalinidade, condutividade e turbidez, cujo procedimento de interpolação espacial foi devidamente validado de forma a possibilitar a análise espacial dos atributos em estudo. Nesse caso, todas as amostras foram analisadas para a determinação de valores dos atributos em estudo, e a metodologia utilizada apresentou-se como uma estratégia para o monitoramento dos recursos hídricos, uma vez que possibilitou a visualização das características pesquisadas naquele corpo hídrico.

## METODOLOGIA

### Interpolação espacial para volumes

A predição, com base nos dados amostrais, de superfície ou volume contínuo de indicadores da qualidade da água foi realizada por meio de procedimentos de interpolação espacial. Em um caso, os valores preditos estão, via de regra, na forma de dado digital matricial ou grade vetorial, em que cada célula, ou posição, corresponde ao valor estimado de um atributo em estudo. Considera-se, nesse caso, o padrão 2,5 D de interpolação espacial para a obtenção do modelo numérico de terreno (MNT) (QUEIROZ; FERREIRA, 2006), que corresponde a um padrão de dado geográfico utilizado para fins diversos. Constam, geralmente, de uma superfície contínua em formato matricial ou grade vetorial, em que a cada célula — ou posição, no segundo caso — corresponde ao valor estimado de um atributo em estudo.

O volume estimado com interpolação espacial pode ser do tipo voxel ou volume de pixel, que correspondem a um conjunto ordenado de elementos de volume. De um dado voxel, pode-se obter uma superfície plana ou seção de volume, ou ainda isosuperfícies — superfícies com isovalores de um atributo em estudo (OLIVEIRA, 2003).

Os procedimentos de interpolação foram realizados utilizando o algoritmo *Spline* Regularizado com Tensão (RST) (MITASOVA; MITAS, 1993; MITASOVA *et al.*, 1995), implementado no SIG *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS) (GRASS DEVELOPMENT TEAM, 2011). O algoritmo *Spline*, utilizado nos procedimentos de interpolação, corresponde a uma função de base radial, com condição

de minimização dos desvios entre valores observados e calculados, ao mesmo tempo em que promove a suavização da superfície obtida (LEITE; SILVA; GOMES, 2007).

A Equação 1, a seguir, apresenta uma síntese da evolução do método supracitado (CEBECAUER; HOFIERKA; ŠŮRI, 2007; SÁRKÖZY, 1999), em que, inicialmente, a condição de mínimos desvios é encontrada em Wahba (1990):

$$\sum_{j=1}^N |p^{[j]} - S(x^{[j]})|^2 w_j + w_0 I(S) = \text{mínimo} \quad (1)$$

Em que  $p^{[j]}$  são valores observados e que estão discretizados em pontos  $x$ , de posições  $x^{[j]} = (x_1^{[j]}, x_2^{[j]})$  com  $j = 1, \dots, N$ , em uma região bidimensional do espaço;  $w_j$  e  $w_0$ , ponderações positivas; e  $I(S)$ , a medida da suavização (*smoothing*). Para  $w_j / w_0 = 0$ , a função  $S(x)$  passa exatamente pelo valor observado. Nesse caso, o método de interpolação seria exato.

A solução geral do problema de minimização, a partir da Equação 1, pode ser expressa como a soma de dois componentes (TALMI; GILAT, 1977), conforme a Equação 2:

$$S(x) = T(x) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(x, x^{[j]}) \quad (2)$$

Em que:

$T(x)$  = uma componente de tendência;

$R(x, x^{[j]})$  = uma função de base radial que depende de  $I(S)$ .

A função RST definida na Equação 2 tem a forma conforme a Equação 3 (MITASOVA *et al.*, 1995):

$$S(x) = a_1 + \sum_{j=1}^N \lambda_j \left\{ -[E_1(\rho) + \ln \rho + C_E] \right\} \quad (3)$$

Em que:

$a_1 = T(x) = \text{constante}$ ;

$\rho = (\phi r/2)^2$ ;

$R_j^2 = \sum_{j=1}^d (x - x^{[j]})^2 = \text{a distância ao quadrado}$ ;

$C_E = \text{constante de Euler (0,577215)}$ ;

$E_1(\cdot) = \text{uma função exponencial integral (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1964)}$ ;

$\phi = \text{um parâmetro generalizado de tensão}$ .

Atualmente, a interpolação tem sido utilizada em muitos campos, como medicina, ecologia, geologia, geografia, oceanografia, engenharia, computação, geofísica, meteorologia, agronomia, hidrologia, e SIG (HARTKAMP *et al.*, 1999; MAZZINI; SCHETTINI, 2009).

O uso de geotecnologias, assim como da interpolação espacial, pode potencializar a visualização de cenários e tendências relacionadas aos

usos múltiplos e aos conflitos gerados pelo desequilíbrio na qualidade das águas superficiais (MAIA *et al.*, 2008).

## Validação dos procedimentos de interpolação espacial

A validação dos resultados após a interpolação espacial, de forma a minimizar os erros na predição dos atributos em estudo, torna-se necessária. Para tanto, foram realizadas análises adicionais desde a apreciação visual dos modelos obtidos, que devem ter a suavização característica de superfícies contínuas, ou mesmo estatísticas.

O primeiro procedimento realizado foi a validação cruzada, que avaliou erros de estimativas e comparou valores estimados e observados, tendo como informação a amostra de dados, como afirmam Isaaks e Srivastava (1989). Segundo Vieira (2000), a validação cruzada se apresenta como uma ferramenta adequada, pois a ideia é: se o fenômeno foi satisfatoriamente modelado, é possível reproduzir, com boa aproximação, informações da amostra.

Após a validação cruzada, e a partir dos resultados obtidos, foi aplicado o Critério de Avaliação de Akaike (AIC), metodologia desenvolvida por Hirotugu Akaike em 1971, sob o nome “critério de informação” e proposto em Akaike (1974). Critério que avalia a qualidade do ajuste do modelo paramétrico, estimado pelo método da máxima verossimilhança (EMILIANO, 2009), o AIC (AKAIKE, 1974), estatística estabelecida a partir da distância de Kulback e Leibler (1951), corresponde a uma medida da discrepância entre as curvas de um modelo verdadeiro e de um modelo aproximado, e é calculado conforme a Equação 4:

$$AIC = -2\ell(\theta) + 2k \quad (4)$$

Em que:

$\ell(\theta)$  = a verossimilhança maximizada do modelo candidato;

$K$  = o número de parâmetros desse modelo.

O menor valor estimado para o AIC indica o modelo mais apropriado para representar o conjunto de dados em análise (LEITE; SILVA; GOMES, 2007).

Também foi empregado o Erro Quadrático Médio (EQM), estatística com vasta utilização por poder ser adotado como estimativa da variância dos desvios de estimação — se a média dos desvios é nula —, calculado pela Equação 5:

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [Zx_j - \hat{Z}x_j]^2 \quad (5)$$

Em que:

$Zx_i$  = o valor observado de  $Z$  para a posição  $x_i$ ; e

$\hat{Z}x_i$  = o valor calculado para a mesma posição.

O menor valor estimado do EQM corresponde ao modelo com melhor aproximação dos valores estimados com os valores observados. O modelo a ser escolhido com base no EQM será o que apresentar menor valor.

Também foi utilizado como critério de seleção o Coeficiente de Determinação  $R^2$ , pois representa a qualidade do ajuste de um modelo linear estabelecido, no caso, entre valores preditos e observados, em cada uma das condições de obtenção das superfícies interpoladas. Segundo Barbeta, Reis e Bornia (2004), ele é calculado conforme a Equação 6:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{Z}x_i - \bar{Z})}{\sum (Zx_i - \bar{Z})} \quad (6)$$

Ou seja, quanto mais próximo da unidade encontrar-se o  $R^2$ , melhor ajuste apresenta o modelo em análise.

Todas as estatísticas utilizadas como critérios de validação dos procedimentos de interpolação espacial foram realizadas no sistema estatístico gráfico e computacional R (R CORE TEAM, 2013), uma linguagem de programação especializada em computação com dados e caracterizado como uma série integrada de instalações de *softwares* para a manipulação de dados, cálculo e exibição gráfica (SILVA; DINIZ; BORTOLUZZI, 2009).

Além da metodologia apresentada anteriormente, também foram selecionados os valores mínimos, médios e máximos dos resultados encontrados para os três atributos, além da disponibilização deles por meio de gráficos confeccionados no programa Excel, para melhor visualização e comparação dos dados.

## Área de estudo

A área de estudo corresponde ao Lago das Cinco Fontes, no Parque Zoobotânico Arruda Câmara (PZAC), em João Pessoa, Paraíba,

localizado entre as coordenadas leste 292670 e 293330 E e norte 9213107 e 9214100 N (Figura 1). Conhecido como BICA, é oriundo da antiga mata do Roger, e possui, atualmente, 26,4 hectares de área. Inaugurado em 24 de dezembro de 1922, seu nome é uma homenagem à memória do ilustre botânico paraibano nascido da cidade de Pombal Dr. Manoel de Arruda Câmara (PREFEITURA DE JOÃO PESSOA, 2011).

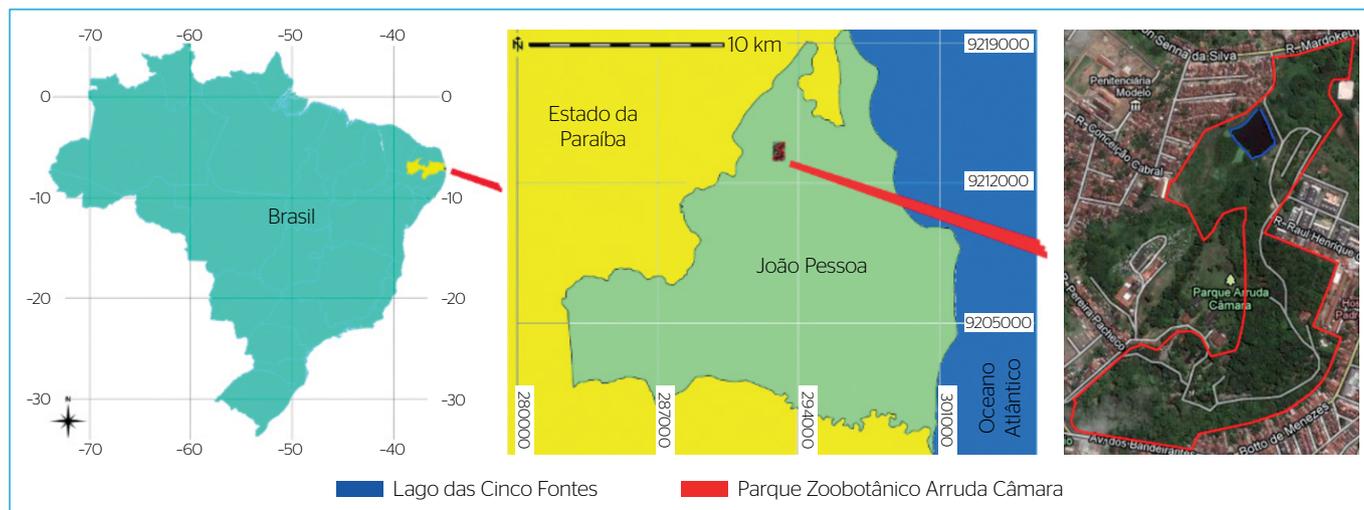
Para as coletas das amostras foram definidos 18 pontos — 9 à superfície e, em mesmas posições, 9 em locais submersos —, com profundidades que variaram entre 1,1 e 1,9 m da superfície (Figura 2). Desse modo, a variabilidade dos valores das concentrações dos atributos analisados pôde ser avaliada a partir de cortes longitudinais e transversais no volume estimado.

Durante o período de pesquisa foram realizadas três coletas de amostras de água nas seguintes datas: 29 de fevereiro, 23 de março e 17 de abril do ano de 2012. As coletas foram realizadas sempre no período matutino, entre 9h e 10h, observando-se todos os procedimentos metodológicos constantes no *Manual Prático de Análise de Água* da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA, 2009). Todos os pontos também foram georreferenciados com GPS de navegação.

Para o presente estudo, foram selecionados os atributos alcalinidade, condutividade e turbidez para serem analisados e todas as análises foram realizadas nos Laboratórios de Água da Área de Meio Ambiente do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), *Campus* João Pessoa, Paraíba.

No Quadro 1, estão relacionados os atributos da qualidade da água avaliados, estabelecidos em consonância com a proposição do trabalho, e os métodos utilizados para a determinação deles.

Com base nos valores das concentrações dos atributos pesquisados, foram realizados os demais procedimentos metodológicos propostos, as estatísticas, as interpolações espaciais, os resultados dos valores mínimos, médios e máximos de cada atributo, além de gráficos comparativos das concentrações encontradas.



**Figura 1** - Localização do Lago das Cinco Fontes, no Parque Zoobotânico Arruda Câmara, em João Pessoa, Paraíba.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos valores mínimos, médios e máximos das contrações da alcalinidade, considerando as duas profundidades, encontradas durante a pesquisa são apresentados na Tabela 1. As mesmas concentrações encontradas para alcalinidade também são apresentadas nos gráficos, considerando as profundidades e os pontos de coleta (Figura 3).

Percebe-se que, para o atributo alcalinidade, na coleta do dia 29 de fevereiro, os menores e maiores valores observados foram de 131 e

148 mg.L; já na coleta do dia 23 de março, 102 e 119 mg.L; e na coleta do dia 17 de abril, 90 e 102 mg.L (Tabela 1). Portanto, pode-se afirmar que houve, durante o período do monitoramento, uma diminuição dos valores das concentrações de alcalinidade presentes no lago.

A seguir, são apresentados os gráficos obtidos por meio dos resultados das análises das concentrações de alcalinidade (Figura 3), em que se pode visualizar os valores das variações desse atributo durante o intervalo de tempo correspondente às três coletas realizadas.



**Figura 2** - Pontos de coleta de amostras de água: (A) nove na superfície do lago; (B) nove em profundidade.

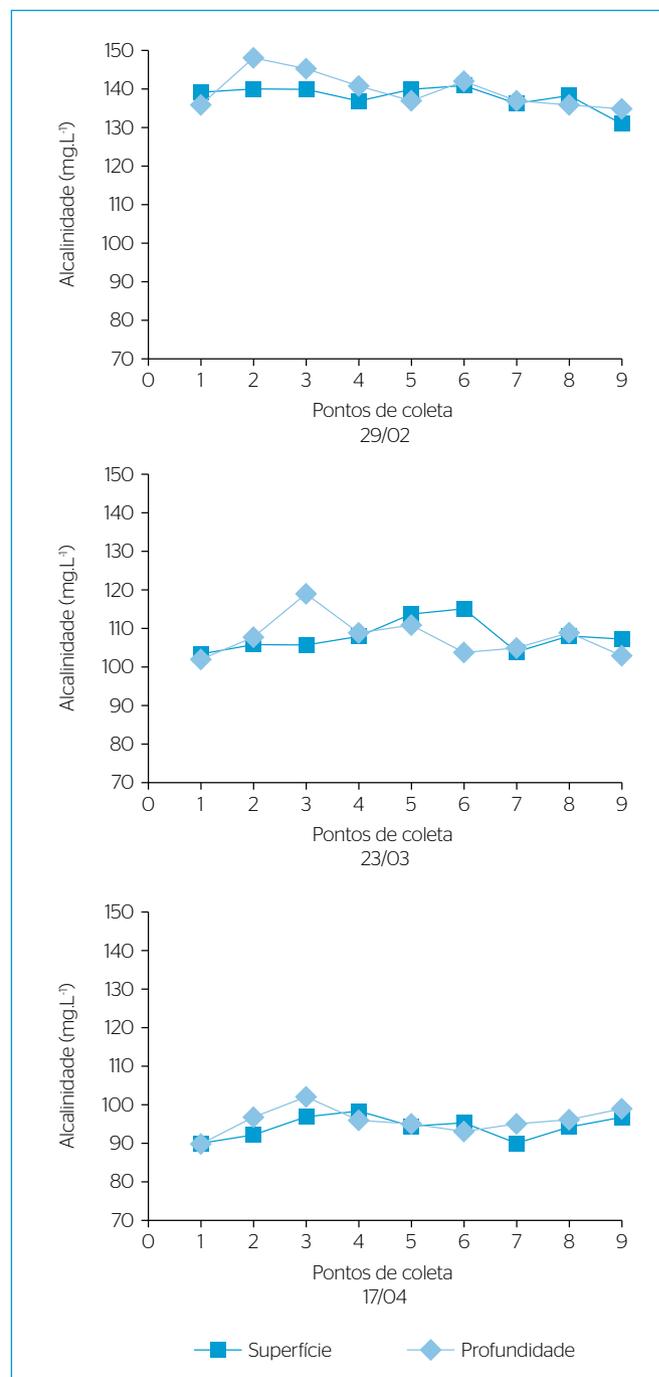
**Quadro 1** - Atributos e indicadores da qualidade da água e métodos utilizados.

Indicador	Método utilizado
Alcalinidade	Golterman; Clyno; Ohnstad, 1978
Condutividade	Eletrônico realizado com condutivímetro MA - 895 Instrutherm
Turbidez	Eletrônico realizado por meio do Turbidímetro Digital Microprocessado DL 350 Dellab

**Tabela 1** - Valores mínimos, médios e máximos de alcalinidade, por ponto e data de coleta.

Datas	Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> )								
	29/02			23/03			17/04		
Pontos	mín.	méd.	máx.	mín.	méd.	máx.	mín.	méd.	máx.
1	136	90,0	139	102	102,5	103	90	90,0	90
2	140	94,5	148	106	107,0	108	92	94,5	97
3	140	99,5	145	106	112,5	119	97	99,5	102
4	137	97,0	141	108	108,5	109	96	97,0	98
5	137	94,5	140	111	112,5	114	94	94,5	95
6	141	94,0	142	104	109,5	115	93	94,0	95
7	136	92,5	137	104	104,5	105	90	92,5	95
8	136	95,0	138	108	108,5	109	94	95,0	96
9	131	98,0	135	103	105,0	107	97	98,0	99

mín.: mínimo; méd.: médio; máx.: máximo.



**Figura 3** - Valores de alcalinidade em função das datas e das profundidades de coleta.

De acordo com os gráficos (Figura 3), os valores dos resultados das análises desse atributo sofreram uma variação bastante visível nos seus níveis de concentração, quando observado o intervalo de tempo correspondente ao período que compreende as três coletas realizadas.

Nas amostras analisadas da coleta do dia 29 de fevereiro, os valores das concentrações de alcalinidade foram os mais elevados, quando comparados com os das concentrações das amostras analisadas das demais coletas, que variaram entre 131 e 148 mg.L<sup>-1</sup>.

Com base nos resultados das amostras da coleta do dia 23 de março, pôde-se observar redução dos valores de concentração da alcalinidade quando comparados com a coleta anterior, com variações entre 102 e 119 mg.L<sup>-1</sup>.

Quanto aos resultados obtidos das amostras coletadas no dia 17 de abril de 2004, foi observada uma significativa diminuição nos níveis de alcalinidade do lago, inclusive quando comparados aos resultados da primeira e da segunda coleta. Assim, foi verificado que os resultados variaram de 90 a 102 mg.L<sup>-1</sup>, fato que pode ter sido causado pelos altos índices pluviométricos no mesmo período da coleta.

Por fim, com base nos resultados de alcalinidade obtidos e na visualização deles, por meio da tabela e dos gráficos gerados, pode-se afirmar que houve, durante o referido período de monitoramento, redução das concentrações de alcalinidade no Lago das Cinco Fontes.

Os resultados dos valores mínimos, médios e máximos da condutividade, considerando as duas profundidades encontradas durante a pesquisa, são apresentados na Tabela 2. Os mesmos valores de condutividade também são apresentados nos gráficos, considerando as profundidades e os pontos de coleta (Figura 4).

Percebe-se que os menores e os maiores valores encontrados para condutividade nas três coletas (29 de fevereiro, 23 de março e 17 de abril) foram 377,0 e 442,0  $\mu\text{S.cm}$ ; 379,5 e 404,0  $\mu\text{S.cm}$ ; e 315,0 e 378,5  $\mu\text{S.cm}$ , respectivamente (Tabela 2). Portanto, pode-se afirmar

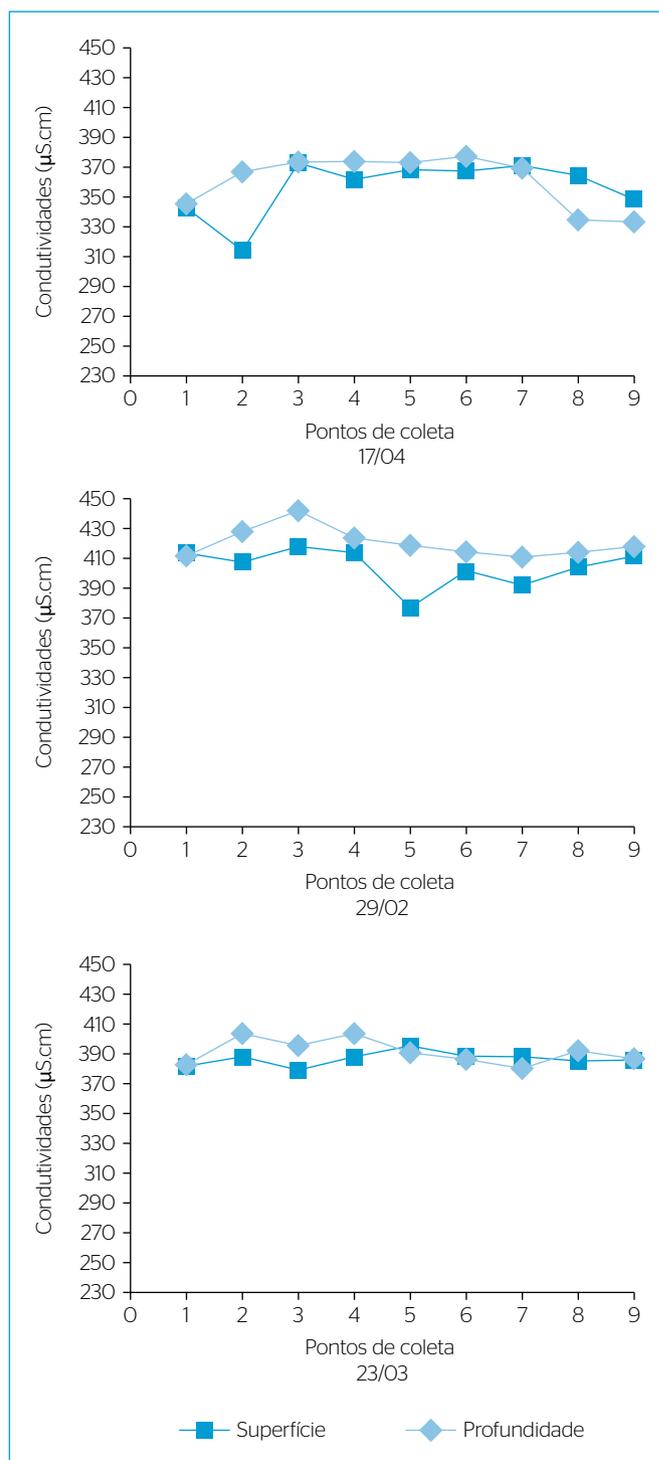
**Tabela 2** - Valores mínimos, médios e máximos de condutividade, por ponto e data de coleta.

Datas	Condutividade ( $\mu\text{S.cm}$ )								
	29/02			23/03			17/04		
Pontos	mín.	méd.	máx.	mín.	méd.	máx.	mín.	méd.	máx.
1	412	413,0	414	382	382,5	383	342	343,5	345
2	407	417,5	428	388	396,0	404	315	341,0	367
3	418	430,0	442	379	387,5	396	372	372,5	373
4	414	419,0	424	388	396,0	388	361	367,0	373
5	377	398,0	419	391	393,5	396	369	370,5	372
6	400	407,5	415	387	388,0	389	366	372,0	378
7	392	401,5	411	381	384,5	388	370	370,5	371
8	404	409,0	414	385	388,5	392	335	349,5	364
9	411	414,5	418	385	386,0	387	334	341,0	348

mín.: mínimo; méd.: médio; máx.: máximo.

que houve, durante o período do monitoramento, diminuição da condutividade no lago.

Com base nos resultados obtidos das análises realizadas, foram elaborados os gráficos das concentrações de condutividade elétrica para as três coletas, apresentados na Figura 4, em que se pode visualizar as



**Figura 4** - Valores de condutividade em função das datas e das profundidades de coleta.

variações referentes ao comportamento desse atributo durante o intervalo correspondente às três análises.

Com base nos gráficos (Figura 4), percebe-se que houve redução dos valores de condutividade durante o período das coletas, em que os maiores valores foram da coleta do dia 29 de fevereiro, e os menores, da do dia 17 de abril. Os níveis de condutividade estavam mais elevados, quando comparados aos valores das concentrações das amostras analisadas nas demais coletas, com resultados que variaram entre 377 e 442  $\mu\text{S.cm}$ .

Quanto aos resultados da coleta do dia 23 de março, conclui-se que houve redução nos níveis de condutividade, quando comparados à coleta anterior, com resultados que variaram entre 379 e 404  $\mu\text{S.cm}$ .

Por fim, com base nos resultados das amostras analisadas da coleta do dia 17 de abril, também podemos observar diminuição significativa da condutividade no lago, até mesmo quando comparados aos resultados obtidos na primeira e na segunda coleta, com valores que variaram entre 315,0 e 378,5  $\mu\text{S.cm}$ .

Portanto, conclui-se que a condutividade apresentou comportamento similar ao da alcalinidade durante o referido período, a princípio com concentrações mais elevadas e, posteriormente, mais baixas. No entanto, os valores encontrados permaneceram acima de 100,0  $\mu\text{S.cm}$ , valor este que, segundo Moraes (2008), pode indicar um ambiente impactado.

Os resultados dos valores mínimos, médios e máximos da turbidez, considerando as duas profundidades encontradas durante a pesquisa, são apresentados na Tabela 3. Os mesmos valores de turbidez também são apresentados nos gráficos, considerando as profundidades e os pontos de coleta (Figura 5).

Vê-se, por meio dos valores da Tabela 3, que os menores e os maiores valores encontrados para condutividade nas três coletas (29 de fevereiro, 23 de março e 17 de abril) foram de 4,14 e 6,51 UNT; 3,15 e 4,68 UNT; e

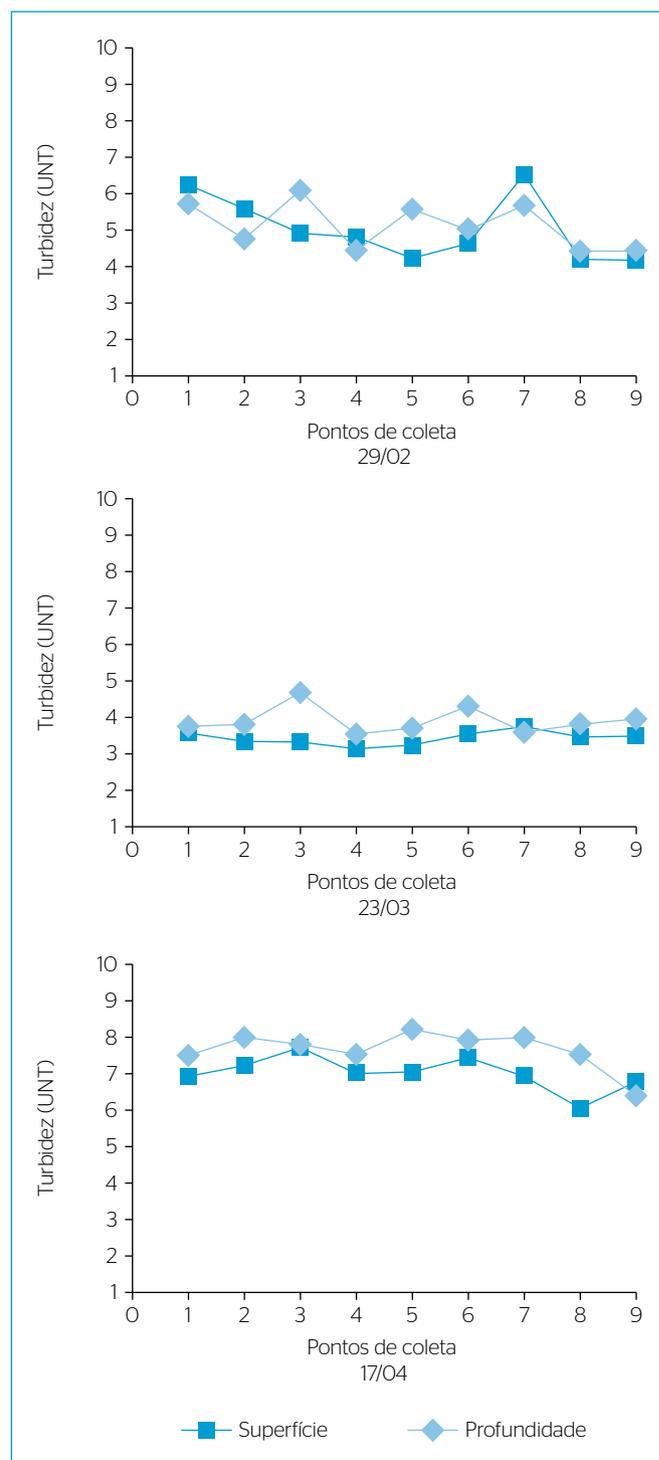
6,01 e 8,22 UNT, respectivamente (Tabela 3). Portanto, pode-se afirmar que houve, no lago, durante o período de monitoramento, o aumento dos valores de turbidez.

Com base nos resultados obtidos a partir das análises realizadas, também foram elaborados os gráficos das concentrações de turbidez para as três coletas (Figura 5), em que se puderam visualizar as

**Tabela 3** - Valores mínimos, médios e máximos de turbidez, por ponto e data de coleta.

Datas	Turbidez (UNT)								
	29/02			23/03			17/04		
	mín.	méd.	máx.	mín.	méd.	máx.	mín.	méd.	máx.
Pontos									
1	5,8	6,01	6,21	3,58	3,68	3,77	6,9	7,20	7,5
2	4,76	5,16	5,55	3,35	3,58	3,8	7,2	7,61	8,02
3	4,96	5,54	6,11	3,3	3,99	4,68	7,7	7,75	7,8
4	4,45	4,63	4,8	3,15	3,36	3,56	7,01	7,27	7,53
5	4,23	4,92	5,6	3,23	3,47	3,71	7,03	7,63	8,22
6	4,65	4,84	5,02	3,52	3,91	4,29	7,45	7,69	7,93
7	5,7	6,11	6,51	3,61	3,67	3,72	6,95	7,48	8,01
8	4,18	4,31	4,43	3,45	3,65	3,84	6,01	6,77	7,53
9	4,14	4,31	4,47	3,47	3,72	3,96	6,43	6,61	6,79

mín.: mínimo; méd.: médio; máx.: máximo.



**Figura 5** - Valores de turbidez em função das datas e das profundidades de coleta.

variações referentes ao comportamento desse atributo durante o intervalo correspondente às três análises, em superfície e em profundidade.

Com base nos gráficos (Figura 5), percebe-se que, entre os resultados das amostras analisadas da coleta do dia 29 de fevereiro, os níveis de turbidez estavam mais elevados, quando comparados aos valores obtidos na coleta seguinte, com resultados que variaram de 4,14 a 6,51 UNT. Já em relação aos resultados obtidos da coleta do dia 23 de março, os valores de turbidez estavam mais baixos, e variaram de 3,15 a 4,68 UNT. Portanto, houve redução dos níveis de turbidez entre a primeira e a segunda coleta.

Já em relação aos resultados referentes à coleta do dia 17 de abril, os níveis de turbidez se elevaram, quando comparados aos da coleta anterior, fazendo desta a coleta com os maiores valores de turbidez observados, com variações entre 6,01 e 8,22 UNT.

Por fim, com base nos resultados de turbidez obtidos e na visualização deles, por meio dos resultados e dos gráficos gerados, pode-se afirmar que houve, durante o referido período de monitoramento, redução nos níveis de turbidez, seguida de elevação na última coleta.

## Validação dos procedimentos de interpolação

Após o procedimento da validação cruzada, foram calculadas as estatísticas utilizadas como critério para otimizar os procedimentos de interpolação. A validação foi realizada no sistema estatístico gráfico e computacional R (R CORE TEAM, 2013), uma linguagem de programação especializada em computação com dados e caracterizado como uma série integrada de instalações de *softwares* para a manipulação de dados, cálculo e exibição gráfica (SILVA; DINIZ; BORTOLUZZI, 2009).

A seguir, encontram-se os resultados das estatísticas AIC, EQM e  $R^2$ , calculadas conforme a metodologia apresentada anteriormente e a partir dos resultados das amostras analisadas (Tabelas 4, 5 e 6).

O AIC, o EQM e o  $R^2$  foram estabelecidos a partir de um modelo linear ajustado entre os dados observados e os valores preditos em cada seção, sendo que, para cada tensão e suavização, foram calculados os valores das estatísticas, em que, a partir da seleção dos resultados (menor AIC e EQM e maior  $R^2$ ), foram estabelecidos os resultados para obtenção das seções, com base na suavização de cada superfície.

**Tabela 4** - Parâmetros de entrada utilizados para interpolação (Critério de Informação de Akaike, Erro Quadrático Médio e Coeficiente de Determinação) dos desvios para a coleta do dia 29 de fevereiro.

Tensão e suavização	Alcalinidade			Condutividade			Turbidez		
	AIC	EQM	$R^2$	AIC	EQM	$R^2$	AIC	EQM	$R^2$
40t e 0,1s	102.910	0,0748	0,544	154.649	0,1386	0,644	42.121	0,0382	0,493
40t e 0,5s	102.763	0,0372	0,535	151.472	0,0624	0,677	42.270	0,0182	0,461
10t e 0,1s	104.299	0,0117	0,542	158.723	0,0205	0,602	44.062	0,0063	0,509
10t e 0,5s	101.898	0,0085	0,560	153.328	0,0008	0,659	41.903	0,0029	0,494
3t e 0,1s	103.612	0,0044	0,562	157.642	0,0088	0,609	43.740	0,0002	0,504
3t e 0,5s	101.224	0,0170	0,582	151.615	0,0499	0,668	42.394	0,0014	0,474
1t e 0,1s	100.428	0,0708	0,629	149.861	0,0937	0,661	43.855	0,0168	0,453
1t e 0,5s	100.274	0,0496	0,591	147.281	0,1636	0,699	43.463	0,0089	0,461

AIC: critério de informação de Akaike; EQM: erro quadrático médio;  $R^2$ : coeficiente de determinação.

**Tabela 5** - Parâmetros de entrada utilizados para interpolação (Critério de Informação de Akaike, Erro Quadrático Médio e Coeficiente de Determinação) dos desvios para a coleta do dia 23 de março.

Tensão e suavização	Alcalinidade			Condutividade			Turbidez		
	AIC	EQM	$R^2$	AIC	EQM	$R^2$	AIC	EQM	$R^2$
40t e 0,1s	115.065	0,0670	0,370	134.035	0,0799	0,463	18.185	0,0068	0,217
40t e 0,5s	112.856	0,0309	0,411	130.704	0,0371	0,526	14.929	0,0030	0,248
10t e 0,1s	118.199	0,0107	0,311	137.463	0,0117	0,400	22.579	0,0121	0,175
10t e 0,5s	114.076	0,0023	0,383	132.364	0,0011	0,493	17.307	0,0052	0,222
3t e 0,1s	117.518	0,0026	0,323	136.747	0,0035	0,411	21.298	0,0092	0,192
3t e 0,5s	113.640	0,0156	0,398	131.356	0,0243	0,510	15.254	0,0040	0,248
1t e 0,1s	114.202	0,0693	0,391	130.974	0,1461	0,508	13.028	0,0031	0,289
1t e 0,5s	113.111	0,0619	0,417	128.825	0,1304	0,551	10.475	0,0004	0,312

AIC: critério de informação de Akaike; EQM: erro quadrático médio;  $R^2$ : coeficiente de determinação.

## Interpolação espacial para volume

Para otimizar os procedimentos de interpolação, foram utilizados valores de 40, 10, 3 e 1 para tensão e 0,1 e 0,5 para suavização e, assim, estimar volumes dos atributos em estudo, constantes no método *Spline* com Tensão Regularizada (MITASOVA *et al.*, 1995). Para a observação das seções transversais e longitudinais, também foi utilizado o software Vis5D.

A seguir, com base nos resultados das estatísticas (Tabelas 4, 5 e 6) e nos critérios de seleção, são apresentadas as seções de volume da área de estudo a 1 m de profundidade e representações voxel, com os respectivos valores de tensão e suavização para os valores preditos de alcalinidade referentes às três coletas (Figuras 6, 7, e 8).

As seções seguintes (Figura 6), com tensão 1 e suavização 0,5, foram definidas a partir dos resultados de menor AIC (100.274) e segundo maior  $R^2$  (0,591) encontrados. Para a coleta do dia 17 de abril, foram definidos tensão 1 e suavização 0,5 como os valores que apresentaram

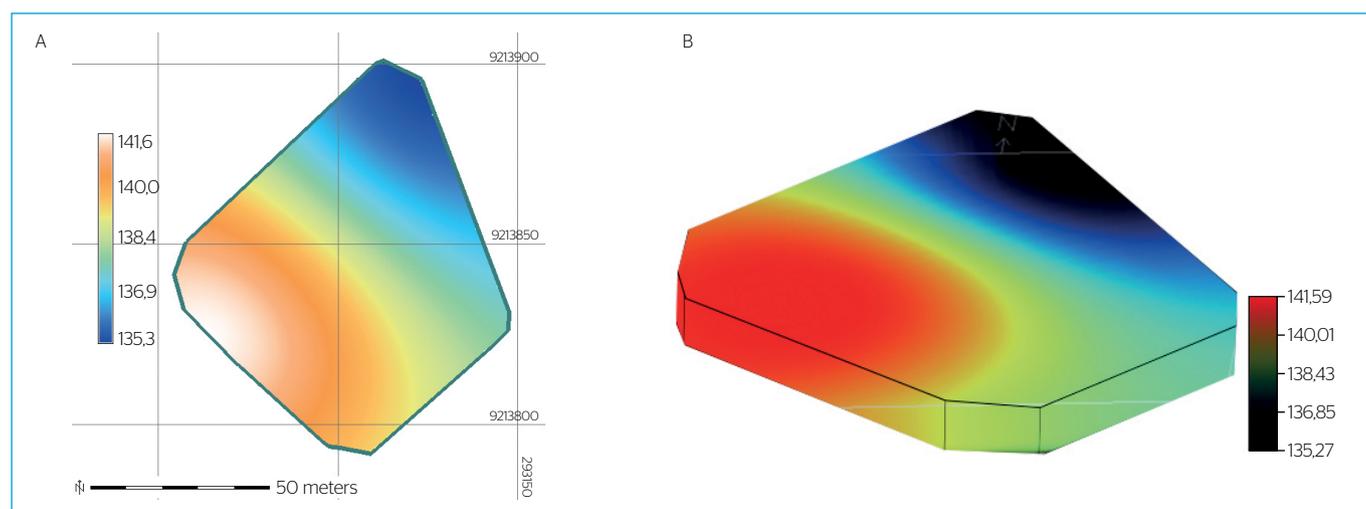
melhor suavização da superfície do lago. Com base nas seções obtidas (Figura 6), observa-se concentração de alcalinidade mais elevada na parte que compreende a região sul, intensificando-se em direção ao lado oeste do lago, com valores que variaram entre 135,3 e 141,6  $\text{mg.L}^{-1}$ . Vale ressaltar que as maiores concentrações de alcalinidade estavam justamente na região do lago que recebe efluentes da comunidade que habita o entorno.

Na seção e na representação voxel da coleta do dia 23 de março, com menores AIC (112.856) e EQM (0,0023) e maior  $R^2$  (0,417), foram selecionadas tensão 40 e suavização 0,5, porém a superfície obtida não apresentou suavização. Foram selecionadas, então, tensão 1 e suavização 0,5, já que, a partir dessa definição, os resultados de AIC (113.111) e  $R^2$  (0,417) apresentaram-se adequados (Figura 7). Em análise às seções obtidas (Figura 7), visualiza-se maior concentração de alcalinidade no centro do lago, direcionando-se à parte oeste, com valores que variaram de 105,6 a 109,8  $\text{mg.L}^{-1}$ . Por

**Tabela 6** - Parâmetros de entrada utilizados para interpolação (Critério de Informação de Akaike, Erro Quadrático Médio e Coeficiente de Determinação) dos desvios para a coleta do dia 17 de abril.

Tensão e suavização	Alcalinidade			Condutividade			Turbidez		
	AIC	EQM	$R^2$	AIC	EQM	$R^2$	AIC	EQM	$R^2$
40t e 0,1s	93.809	0,0566	0,654	161.688	0,0188	0,453	33.333	0,0027	0,543
40t e 0,5s	94.166	0,0282	0,637	160.191	0,0129	0,466	29.220	0,0013	0,614
10t e 0,1s	95.104	0,0091	0,645	164.106	0,0062	0,420	37.061	0,0003	0,478
10t e 0,5s	93.232	0,0067	0,651	160.699	0,0121	0,460	31.468	0,0001	0,576
3t e 0,1s	94.608	0,0026	0,641	163.255	0,0097	0,432	36.195	0,0002	0,491
3t e 0,5s	92.595	0,0102	0,642	159.926	0,0433	0,469	30.179	0,0003	0,598
1t e 0,1s	91.625	0,0022	0,628	158.202	0,0604	0,495	30.195	0,0024	0,600
1t e 0,5s	91.805	0,0215	0,630	160.772	0,1171	0,448	26.634	0,0038	0,661

AIC: critério de informação de Akaike; EQM: erro quadrático médio;  $R^2$ : coeficiente de determinação.



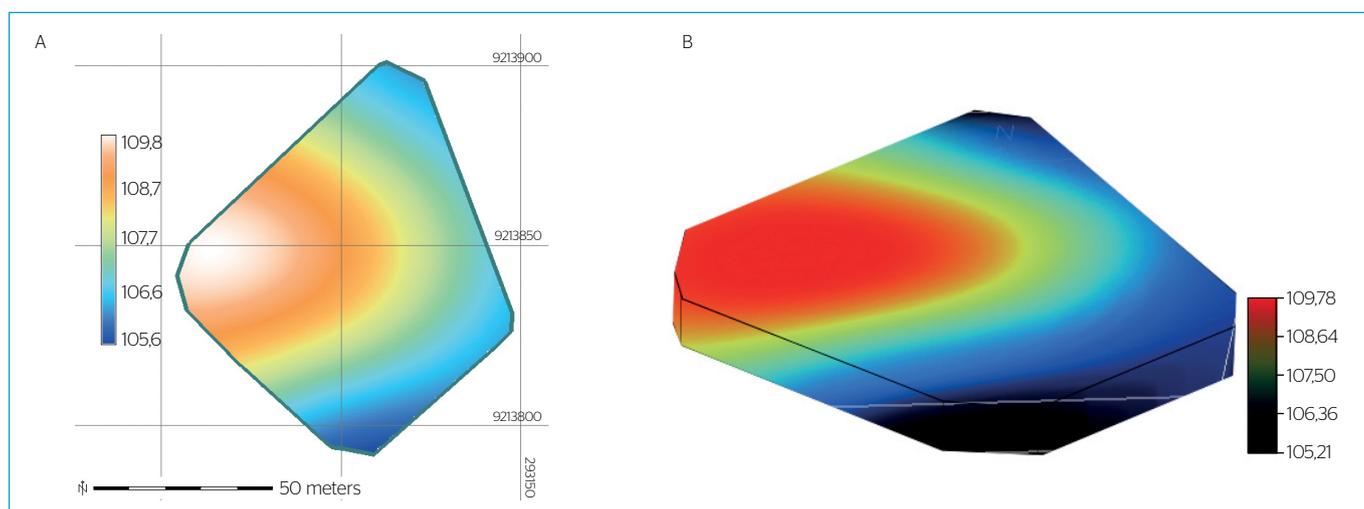
**Figura 6** - (A) Seção do volume a 1 m de profundidade; (B) representação voxel de valores preditos da alcalinidade no lago na coleta de 29 de fevereiro, com tensão 1 e suavização 0,5.

outro lado, as menores concentrações presentes no lago migraram, localizadas na porção norte e estendendo-se pela parte leste até a porção sul do lago.

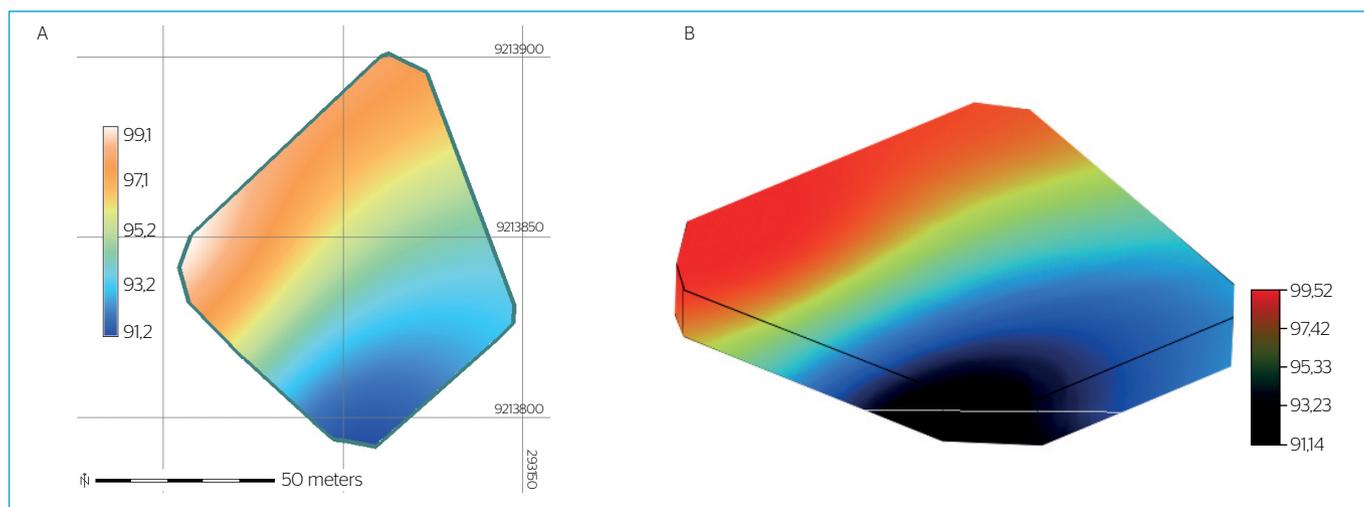
Já nas imagens seguintes (Figura 8), são apresentadas seções referentes às concentrações de alcalinidade, observadas e previstas para a coleta realizada em 17 de abril. Os valores das concentrações de alcalinidade, para a referida coleta, foram entre 91,2 e 99,1 mg.L<sup>-1</sup>, abaixo daqueles observados na coleta anterior, em que os menores e os maiores valores na superfície variaram entre 105,6 e 109,8 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Na obtenção das seções referentes à última coleta (17 de abril), com menores AIC (91.625) e EQM (0,0022), e com tensão 1 e suavização 0,1, percebeu-se maior concentração de alcalinidade desde

a parte oeste do lago até a região norte, onde há aporte de efluentes domésticos. Nesse caso, os níveis de alcalinidade foram os menores encontrados durante todas as análises, e houve, portanto, uma diminuição nos níveis de alcalinidade no lago. Observa-se que o comportamento espaço temporal da alcalinidade foi contínuo, tanto em relação às concentrações mais elevadas na primeira coleta e mais baixas na última coleta, como espacialmente, que seguiu desde o lado oeste, na primeira coleta, até o lado norte, na última coleta, contrariamente aos valores mais baixos, que migraram da parte norte do lago para a parte sul (última coleta). Vale ressaltar que as maiores concentrações de alcalinidade foram encontradas na região que recebe os efluentes domésticos da comunidade localizada no entorno.



**Figura 7 - (A)** Seção do volume a 1 m de profundidade; **(B)** representação voxel de valores previstos da alcalinidade no lago na coleta de 23 de março, com tensão 1 e suavização 0,5.



**Figura 8 - (A)** Seção do volume a 1 m de profundidade; **(B)** representação voxel de valores previstos da alcalinidade no lago na coleta de 17 de abril, com tensão 1 e suavização 0,1.

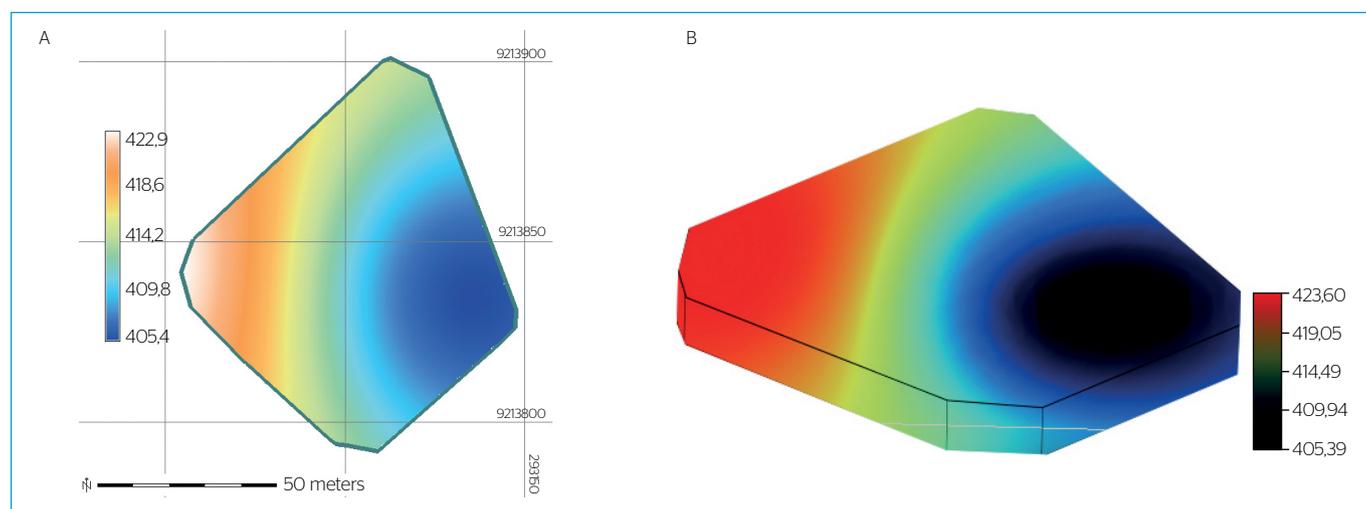
A seguir, com base nos resultados das estatísticas (Tabelas 4, 5 e 6) e nos critérios de seleção, são apresentadas seções de volume a 1 m de profundidade e representações voxel, com os respectivos valores de tensão e suavização, para os valores preditos de condutividade referente às três coletas (Figuras 9, 10, e 11).

Na imagem obtida (Figura 9), são apresentadas seções com estabelecimento de superfícies contínuas e de volume das concentrações de condutividade. Os valores de tensão e suavização foram de 1t e 0,5s, respectivamente, sendo os que continham dois dos critérios para a obtenção da imagem, o menor AIC (147.281) e o maior  $R^2$  (0,699), não sendo o que continha o menor EQM (0,0008). Pôde-se perceber que os valores observados e preditos para a condutividade variaram entre 405,4 e 422,9  $\mu\text{S.cm}$ .

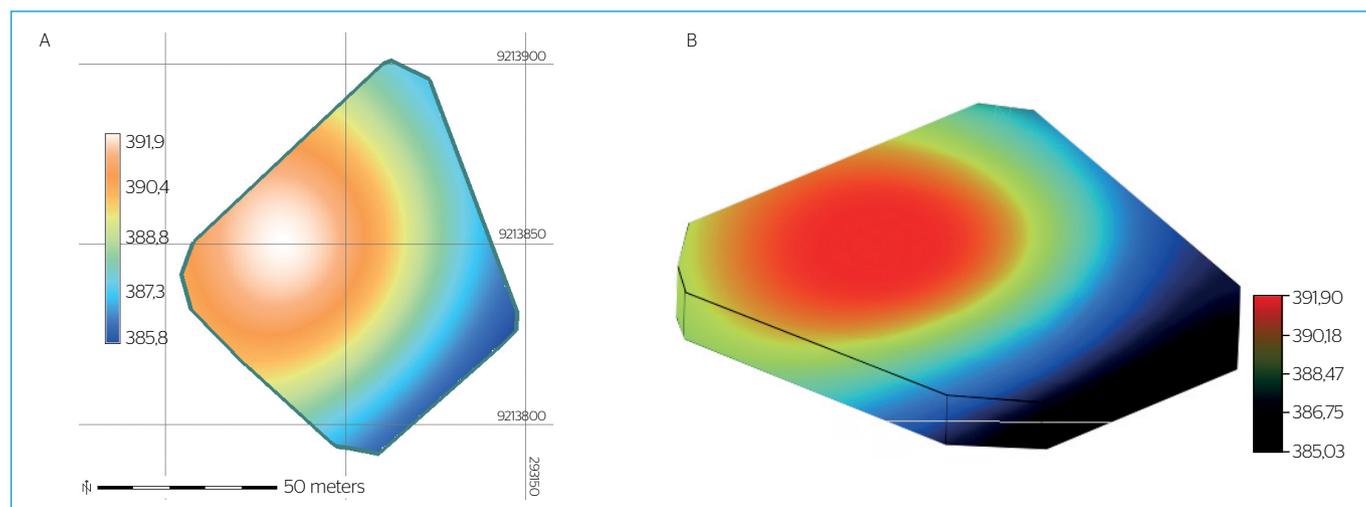
Observa-se também que a região que compreende a parte leste do lago apresentou valores mais baixos para condutividade, enquanto houve elevação da condutividade na parte que compreende o lado oeste do lago, onde há aportes de efluentes líquidos.

Já nas imagens seguintes (Figura 10) são apresentadas as seções de condutividade presentes no lago na coleta de 23 de março, em que é possível observar valores que variaram entre 385,8 e 391,9  $\mu\text{S.cm}$ , e que a seção foi obtida com tensão 1 e suavização 0,5, uma vez que contemplava o menor AIC (128.825) e o maior  $R^2$  (0,551).

Observa-se que, ao compararmos seções da mesma coleta, as concentrações de condutividade apresentaram distribuição espacial similar ao da alcalinidade, ou seja, níveis mais elevados desses atributos na região central do lago, intensificados em direção ao lado oeste do



**Figura 9** - (A) Seção do volume a 1 m de profundidade e (B) representação voxel de valores preditos da condutividade no lago na coleta de 29 de fevereiro, com tensão 1 e suavização 0,5.



**Figura 10** - (A) Seção do volume a 1 m de profundidade; (B) representação voxel de valores preditos da condutividade no lago na coleta de 23 de março, com tensão 1 e suavização 0,5.

lago. Por outro lado, valores mais baixos indicaram que havia menor concentração, tanto da condutividade quanto da alcalinidade, nas regiões leste e sul do lago, comportamento também observado nas seções da coleta anterior, porém com resultados inferiores.

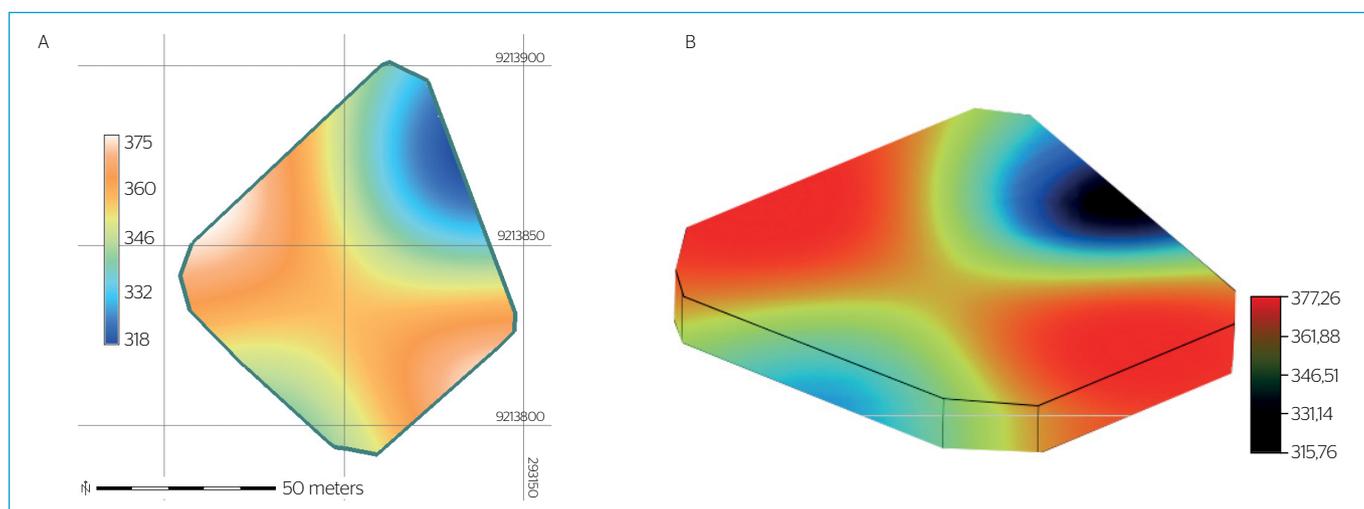
As seções referentes à coleta do dia 17 de abril (Figura 11) foram estabelecidas com base no menor AIC (158.202) e no maior  $R^2$  (0,495), e apresentaram tensão 1 e suavização 0,1. Com base nelas, observa-se que os níveis de condutividade presentes no lago se comportaram contrários aos observados na coleta anterior, uma vez que, nesta, as maiores concentrações estavam presentes na maior parte do lago, com exceção apenas da parte nordeste e de uma pequena porção na parte sudoeste. Os níveis de condutividade apresentaram valores, preditos e observados, entre 318 e

375  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}$ , e os níveis mais elevados estiveram presentes em praticamente toda a extensão do lago.

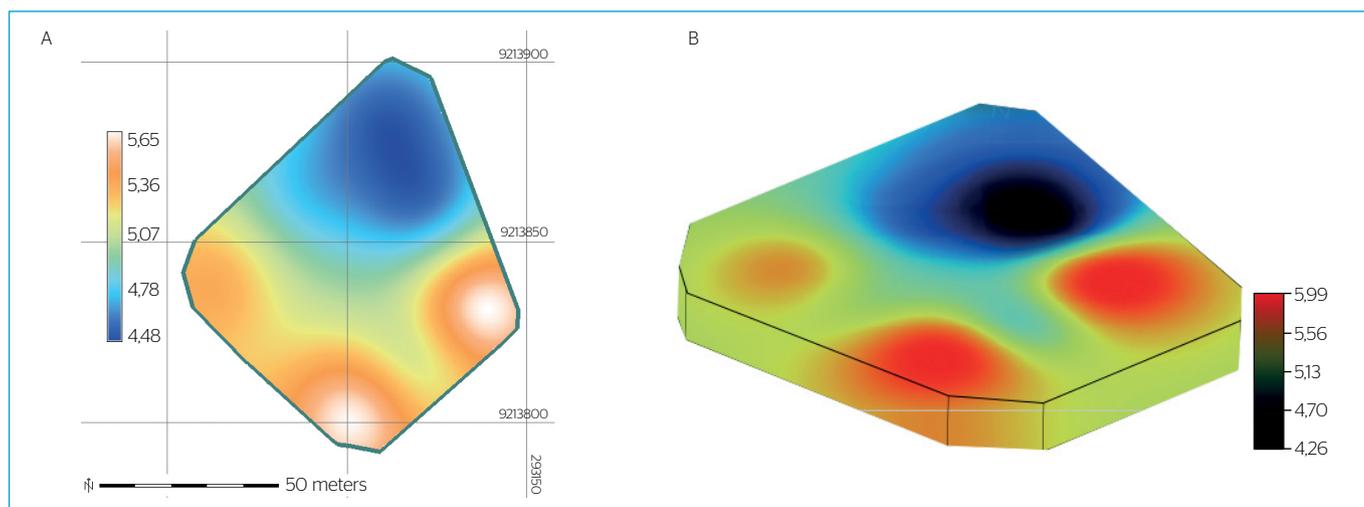
Por fim, vê-se que os índices nos níveis de condutividade observados no lago, durante as três coletas, caíram ao longo do monitoramento realizado, fato também observado em relação ao atributo alcalinidade.

A seguir, com base nos resultados das estatísticas (Tabelas 4, 5 e 6) e nos critérios de seleção, são apresentadas seções de volume a 1 m de profundidade e representações voxel, com os respectivos valores de tensão e suavização, para os valores preditos de turbidez referente às três coletas (Figuras 12, 13, e 14).

Para a coleta do dia 29 de fevereiro, e com base nos critérios de seleção, menor AIC (41.903) e maior  $R^2$  (0,509), os resultados das imagens



**Figura 11 - (A) Seção do volume a 1 m de profundidade e (B) representação voxel de valores preditos da condutividade no lago na coleta de 17 de abril, com tensão 1 e suavização 0,1.**



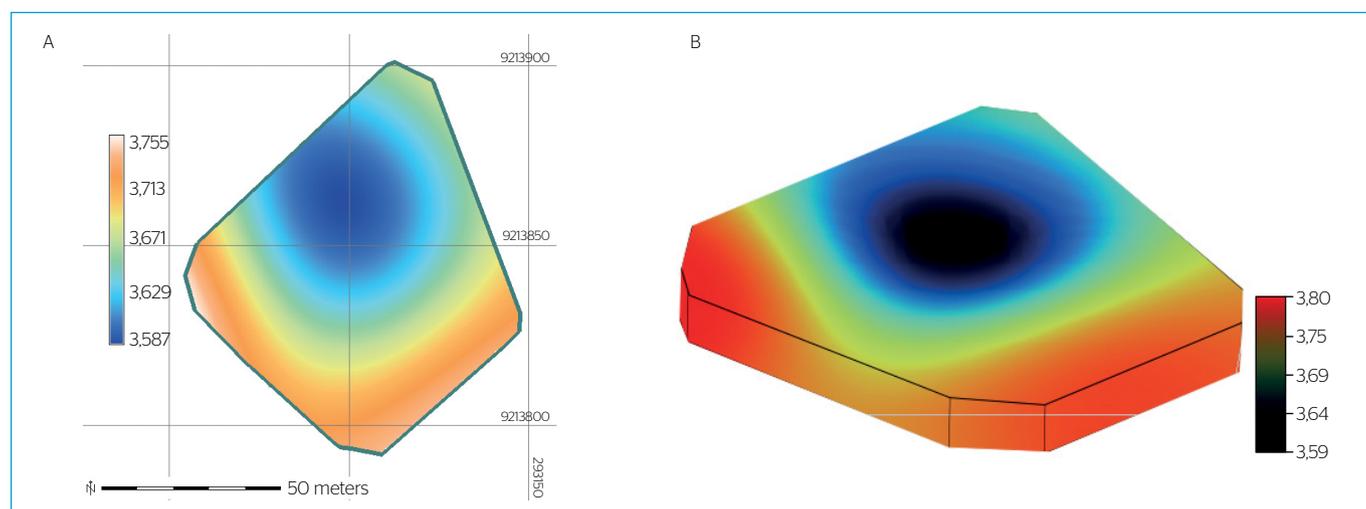
**Figura 12 - (A) Seção do volume a 1 m de profundidade; (B) representação voxel de valores preditos da turbidez no lago na coleta de 29 de fevereiro, com tensão 3 e suavização 0,1.**

obtidas não apresentaram superfície suavizada, tornando-se necessária a seleção de novos valores de tensão e suavização para a referida coleta. Foram estabelecidos, então, tensão e suavização de 3 e 0,1 respectivamente (Figura 12) — estes contemplaram os segundos melhores valores dos critérios de seleção, menor EQM (0,0002) e maior  $R^2$  (0,504). Pôde-se visualizar que os índices de turbidez presentes no lago variaram de 4,48 a 5,65 UNT. Os valores mais baixos estiveram concentrados na parte norte do lago, enquanto os mais elevados, na parte sul, próximo ao pedacinho existente no lago, e nas partes leste e oeste, onde há quantidade maior de vegetação de pequeno e médio porte (Figura 12).

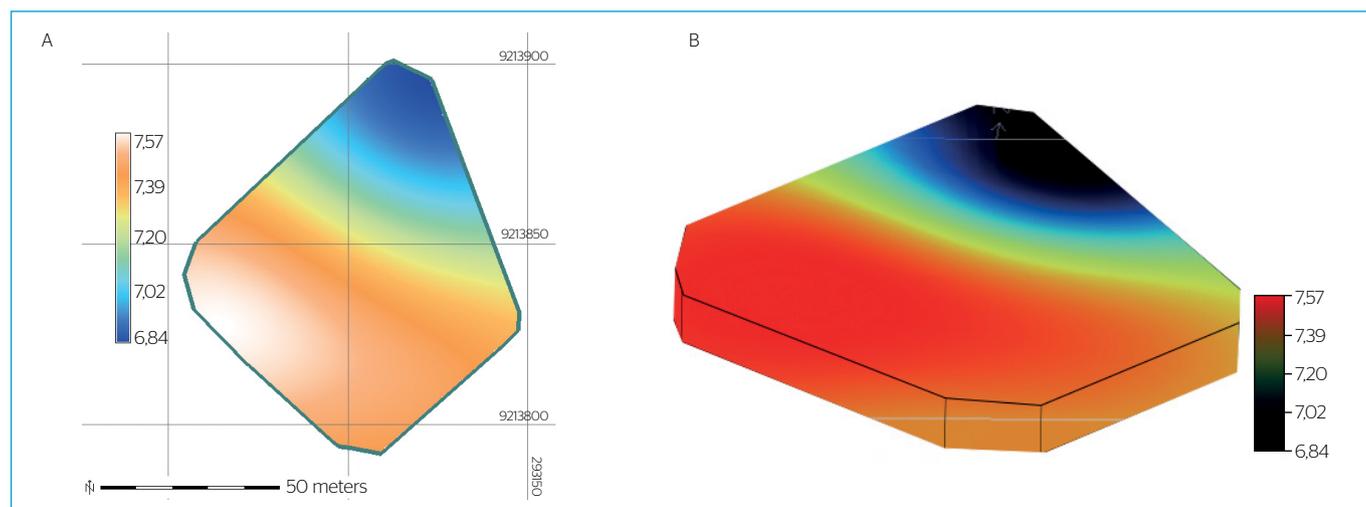
Em relação à segunda coleta (23 de março), foram estabelecidas tensão 1 e suavização 0,5, pois contemplavam menores AIC e EQM — 10.475 e 0,0004, respectivamente — e maior  $R^2$  (0,312).

Com base na visualização das seções (Figura 13), observa-se que os índices de turbidez presentes no lago apresentaram valores que variaram de 3,587 a 3,755 UNT. Quando comparados aos índices da coleta anterior, percebe-se que não houve variação significativa nas concentrações de turbidez, tanto em relação aos valores dos resultados quanto à sua distribuição espacial no lago (Figura 12). Verifica-se também que as maiores concentrações estavam presentes nas partes sul, leste e oeste do lago, enquanto as menores, na porção norte. Portanto, com base nas imagens e nos resultados obtidos, vê-se que não houve variação significativa em relação aos níveis de turbidez presentes no lago, entre a primeira e a segunda coleta.

Nas seções referentes à última coleta, realizada em 17 de abril, observa-se menor AIC (26.634) e maior  $R^2$  (0,661), com tensão 1 e



**Figura 13** - (A) Seção do volume a 1 m de profundidade; (B) representação voxel de valores preditos da turbidez no lago na coleta de 23 de março, com tensão 1 e suavização 0,5.



**Figura 14** - (A) Seção do volume a 1 m de profundidade; (B) representação voxel de valores preditos da turbidez no lago na coleta de 17 de abril, com tensão 1 e suavização 0,5.

suavização 0,5. Na coleta, a turbidez apresentou níveis mais elevados na região sul do lago, intensificando-se mais em direção as partes do centro, leste e oeste do lago, com valores que variaram de 6,01 a 8,22 UNT. No entanto, sua distribuição espacial no lago apresentou comportamento similar ao observado na coleta anterior (Figura 14).

## CONCLUSÕES

Todos os valores preditos situaram-se na faixa daqueles observados, não extrapolando os valores obtidos com as análises de laboratório, em que a variabilidade espacial dos atributos em estudo seguiu, no geral, padrão específico, contudo vale ressaltar também que não foi possível obter grande variação em relação aos valores preditos, uma vez que o lago não apresenta grandes variações de profundidade, sendo de, no máximo, 1,9 m.

A metodologia de análise utilizada contribuiu principalmente para a visualização espacial apresentada pelo comportamento dos níveis das concentrações dos atributos analisados (alcalinidade, condutividade e turbidez).

Também foi possível obter a visualização espacial dos níveis das concentrações de cada atributo em todo o lago. Nesse caso, as interpolações, que consideraram as duas profundidades em que as amostras foram coletadas, permitiram a visualização e, conseqüentemente, a obtenção de todas as seções. Desse modo, também foi possível observar valores mínimos, médios e máximos das concentrações de todos os atributos analisados.

Todos os procedimentos metodológicos utilizados apresentaram-se como ferramenta estratégica para o monitoramento da qualidade da água de corpos hídricos.

Não obstante, é importante ressaltar que, para que se possa estabelecer critérios de qualidade, também são necessárias ações de controle e prevenção para a conservação da qualidade ambiental hídrica.

Procedimentos assim podem subsidiar a elaboração de estratégias mais específicas para o monitoramento dos recursos hídricos.

## FONTE DE FINANCIAMENTO

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I.A. (1964) *Handbook of Mathematical Functions*. Nova York: Dover.
- AKAIKE, H. (1974) Implications of the informational point of view on the development of statistical science. *Engineering and Scientific Applications*, v. 3, p. 27-38.
- ALVES, E.D.L.; BIUDES, M.S.; VECCHIA, F.A.S. (2012) Interpolação espacial na climatologia: análise dos critérios que precedem sua aplicação. *Revista Geonorte*, Edição Especial 2, v. 3, n. 8, p. 606-618. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufam.edu.br/revista-geonorte/article/view/2398>>. Acesso em: 20 fev. 2014.
- BARBETTA, P.A.; REIS, M.M.; BORNIA, A.C. (2004) *Estatística para cursos de engenharia e informática*. São Paulo: Atlas. 410 p.
- BUKATA, R.P.; JEROME, J.H.; KONDRATYEV, K.Y.; POZDNYAKOV, D.V. (1995) *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters*. Burlington: Environment Canada, Aquatic Ecosystem Conservation Branch, National Water Research Institute. 362 p.
- CEBECAUER, T.; HOFIERKA, J.; ŠŮRI, M. (2007) Optimisation of Interpolation Parameters Using a Cross-validation. In: PECKHAM R.J., JORDAN G. (eds.). *Digital Terrain Modelling, Development and Applications in a Policy Support Environment*. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer. p. 67-82.
- EMILIANO, P.C. (2009) *Fundamentos e Aplicações dos Critérios de Informação: Akaike e Bayesiano*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). (2009) *Manual Prático de Análise de Água*. 3. ed. Brasília: FUNASA. 146 p.
- GOLTERMAN, H.L.; CLYNO, R.S.; OHNSTAD, M.A.M. (1978) *Methods for physical and chemical analysis of freshwaters*. 2 ed. Oxford: Blackwell Scientific Publication. 315 p.
- GRASS DEVELOPMENT TEAM. (2011) *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) - Software*. GRASS grid3d raster volume Interface. Trento, Itália: Grass Development Team. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/programming6/>>. Acesso em: 9 fev. 2014.
- HARTKAMP, A.D.; DE BEURS, K.; STEIN, A.; WHITE, J.W. (1999) Interpolation Techniques for Climate Variables. NRG-GIS Series 99-01. CIMMYT, p. 26.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. (1989) An introduction to applied geostatistics. Oxford: Oxford University Press. 560 p.
- KULBACK, S.; LEIBLER, R.A. (1951) On information and sufficiency. *Annals of Mathematical Statistics*, v. 22, n. 1, p. 79-86. <http://doi.org/10.1214/aoms/1177729694>

- LEITE, E.P.F. (2005) *Caracterização hidrológica e de atributos físico-hídricos dos solos da bacia hidrográfica do rio cabelo, utilizando sistemas computacionais livres*. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- LEITE, E.P.F.; SILVA, J.S.; GOMES, G.S. (2007) Obtenção de modelo numérico do terreno de alta resolução utilizando o interpolador Spline com tensão regularizada. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 2007, João Pessoa. *Anais...* p. 1-10. 1 CD-ROM.
- MAIA, J.L.; MAUAD, F.F.; ALBERTIN, L.L.; BARBOSA, A.A. (2008) Uso de Geotecnologias para Análise Espacial da Qualidade da Água no Reservatório de Barra Bonita – SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 141-149. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=16&SUMARIO=205>>. Acesso em: 7 mar. 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n2.p141-149>
- MAZZINI, P.L.F.; SCHETTINI, C.A.F. (2009) Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 13, n. 1, p. 53-64.
- MITASOVA, H.; MITAS, L. (1993) Interpolation by regularized Spline with tension: I. Theory and implementation. *Mathematical Geology*, v. 25, n. 6, p. 641-655. <https://doi.org/10.1007/BF00893171>
- MITASOVA, H.; MITAS, L.; BROWN, W.M.; GERDES, D.P.; KOSINOVSKY, I.; BAKER, T. (1995) Modeling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, Leicester, v. 9, n. 4, p. 433-446. <https://doi.org/10.1080/02693799508902048>
- MORAES, P.B. (2008) *Tratamento Biológico de Efluentes Líquidos/ Tratamento Físico-Químico de Efluentes Líquidos*. Curso Superior de Tecnologia em Saneamento Ambiental, CESET/UNICAMP, Campinas. Nota de Aula.
- OLIVEIRA, M.C.N. (2003) *Métodos de estimação de parâmetros em modelos geoestatísticos com diferentes estruturas de covariâncias: uma aplicação ao teor de cálcio no solo*. 140f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- PHILIPPI JR., A.; ROMERO, M.A.; BRUNA, G.C. (2004) *Curso de Gestão Ambiental*. Barueri: Manole. (Coleção Ambiental)
- PREFEITURA DE JOÃO PESSOA (2011) Secretaria do Meio Ambiente. Disponível em <<http://www.joaopessoa.pb.gov.br/>> Acesso em: 12 fev. 2014.
- QUEIROZ, G.R.; FERREIRA, K.R. (2006) *Tutorial sobre Bancos de Dados Geográficos*. GeoBrasil. Brasil: Ministério da Ciência e Tecnologia.
- R CORE TEAM. (2013) *R: A language and environment for statistical computing*. Viena: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: dez. 2013.
- SÁRKÖZY, F. (1999) GIS functions – interpolation. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, v. 43, n. 1, p. 63-87.
- SILVA, B.F.; DINIZ, J.; BORTOLUZZI, M.A. (2009) Minicurso de Estatística Básica: Introdução ao software R. Programa de Educação Tutorial – Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, RS. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313744/mod\\_resource/content/1/ApostilaRUnivStaMaria.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313744/mod_resource/content/1/ApostilaRUnivStaMaria.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2014.
- SILVA, L.M.T. (2012) Espaços Verdes em João Pessoa: Planejamento e Realidade. In: SEABRA, G. (org.). *Terra, Cidades, Natureza e Bem-estar*. João Pessoa: Universitária UFPB. v. 1. p. 185-200.
- TALMI, A.; GILAT, G. (1977) Método de aproximação suave de dados. *Journal of Física Computacional*, n. 23, p. 93-123.
- TOLEDO, L.G.; NICOLELLA, G. (2002) Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. *Scientia Agrícola*, São Paulo, v. 59, n. 1, p. 181-186. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162002000100026>
- TUNDISI, J.G. (2003) *Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez*. São Carlos: RiMa.
- VIEIRA, S.R. (2000) Geoestatística em Estudos de Variabilidade Espacial do Solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (eds.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v. 1. p. 1-54.
- VIS5D. Disponível em: <<http://www.ssec.wisc.edu/~billh/vis5d.html>>. Acesso em: fev. 2014.
- VON SPERLING, M. (2005) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
- WAHBA, G. (1990) Spline models for observation data. Society for Industrial and Applied Mathematics.